

# Bir uçağın yatış açısı kontrolü için farklı tip denetleyici karşılaştırmaları

**Emre KIYAK\***

Anadolu Üniversitesi, 2 Eylül Kampusu, Sivil Havacılık Yüksekokulu, 26470, Eskişehir

## Özet

*Kapalı çevrim kontrol sistemleri, kontrol edilen çıkış değişkeninin ölçülüp geri beslenerek arzu edilen giriş değişkeni ile karşılaştırıldığı sistemlerdir. Sistemin çıkışı, arzu edilen çıkış değerini sağlayacak biçimde giriş büyüklüğü ile ayarlanır. Negatif geri beslemede daima giriş ile çıkışın bir farkı alınır. Kontrol elemanına bir hata girişi olarak iletilen bu fark, çıkışın istenilen değere getirilmesini ve bu değerinde sabit tutulmasını sağlar. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde denetleyicinin amacı, hata değerinin yapısına ve kendi denetim etkisine bağlı olarak uygun bir kumanda denetim sinyali üretmektir. Sistem yapısına bağlı olarak bir takım ayarlamalar ile P, PI, PD ve PID denetleyiciler, bu amaçla sıklıkla kullanılan geleneksel denetleyicilerdir. Klasik denetleyicilerin yetersiz kaldığı durumlarda, bulanık denetleyiciler de bu amaçla kullanılabilir olup, burada da üyelik fonksiyonları ve kuralların seçimi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, bir uçağın uçuş kontrol sisteminde önem arzeden yatış açısı kontrolü için klasik denetleyicilerden P, PD, PI tip denetleyiciler ile küme ve kuralları deneme yoluyla oluşturulmuş bulanık denetleyicinin karşılaştırmaları yapılmaktadır. Klasik denetleyicilerde kazanç ayarlamalarıyla, bulanık denetleyicide ise üyelik fonksiyonlarının ve kurallarının seçilmesi ile elde edilen çıktılar karşılaştırıldıklarında, eğer yatışkın duruma daha çabuk ulaşmak isteniyor ve belli bir kararlılık hata tolerans değeri söz konusuysa P veya PD denetleyicili sistem, yatışkın duruma gelme zamanından daha çok kararlılık hatası değerinin minimum olması hedefse PI denetleyicili sistem ya da bunların kesişimi şeklinde bir çözüm aranıyorsa bulanık denetleyicili sistem kullanım yoluna gidilebilir sonucuna ulaşılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Otomatik uçuş kontrol, klasik denetleyiciler, bulanık denetleyiciler.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Emre KIYAK. ekiyak@anadolu.edu.tr; Tel: (222) 335 05 80 dahili: 6873.

Makale metni 19.08.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.01.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Comparison of different types of controllers for the control of the pitch angle of an airplane

### Extended abstract

*Basic automatic control system consists of controller, actuator, sensor and plant. In a closed loop control system, the difference between the input and feedback is fed to the controller so as to reduce the error and bring the output of the system to a desired value. The actuator is a power device that produces the input to the plant according to the control signal so that the output will approach the reference input. The sensor converts the output variable into another suitable variable. An advantage of this system is the fact that the use of feedback makes the system response relatively insensitive to external disturbances and internal variations.*

*The aim of the controller of the closed loop control systems is to produce an output following the input. P, PD, PI and PID controllers are widely used for this aim with some variations according to the system structure. These controllers have advantages and disadvantages. P type controller's main advantage is its simplicity. The advantage is I controller is that the output is proportional to the accumulated error. Thus, error can be eliminated by using it. The advantage is D controller is that the controller will provide large connections before the error becomes large. P type controller's main disadvantage is that there may be fix steady state error. The disadvantage is I controller is that the system less stable if adding the pole at the origin. The disadvantage is D controller is that if the error is constant it will not produce a control output.*

*While designing the control system with classical controllers, the root locus technique allows the designer to examine the movement of the closed loop poles of the control system as a function design variables. Classical controller is based on mathematical model. In many cases, the mathematical model of the control process may not exist, or may be too "expensive" in terms of computer processing power and memory, and a system based on empirical rules may be more effective.*

*If the model is known less, or not got, the control reaction is not produced. In this situation, the fuzzy logic, neural network and genetic algorithm based on developing controller algorithms are also used.*

*The fuzzy logic controllers can be used for this aim, for which the membership functions and the choice of the rules are essential. A fuzzy control system is a control system based on fuzzy logic. A mathematical system that analyzes analog input values in terms of logical variables that take on continuous values between 0 and 1, in contrast to classical or digital logic, which operates on discrete values of either 0 and 1 (true and false). The input variables in a fuzzy control system are in general mapped into by sets of membership functions similar to this, known as "fuzzy sets". The process of converting a crisp input value to a fuzzy value is called "fuzzification". Given "mappings" of input variables into membership functions and truth values, the microcontroller then makes decisions for what action to take based on a set of "rules". Rules can be solved in parallel in hardware, or sequentially in software. The results of all the rules that have fired are "defuzzified" to a crisp value by one of several methods.*

*Although genetic algorithms and neural networks can perform just as well as fuzzy logic in many cases, fuzzy logic has the advantage that the solution to the problem can be cast in terms that human operators can understand, so that their experience can be used in the design of the controller. This makes it easier to mechanize tasks that are already successfully performed by humans.*

*In this study, the comparison of the P, PD, PI and fuzzy controllers are realized by utilizing the roll control system of an airplane. The system is composed of a comparator, actuator and aircraft equation of motion. Sensor is considered to be perfect device and represented as a unity feedback.*

*The P type controller is designed from root locus plot at the crossover point. The PD type controller is get from desired stability errors using time domain. The PI type controller is designed using Routh-Hurwitz stability criterion. In classical controllers, the outputs having the preferred performance can be obtained by adjusting the gain; whereas, for the fuzzy controllers better values can be obtained by increasing the number of input and output functions and the number of the rules.*

**Keywords:** Automatic flight control, traditional controllers, fuzzy controllers.

## Giriş

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinin amacı, girişte verilen değerin çıkışta elde edilmesi ya da girişi takip eden bir çıktı üretme şeklinde söylenebilir. Şekil 1’de, kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı verilmektedir. Burada, karşılaştırıcı, istenen giriş değeri ile çıkışın algılayıcı tarafından ölçülen değerini karşılaştırır ve bir hata sinyali ( $e(t)$ ) üretir. Denetleyici, hata sinyalini giriş olarak kullanır ve kendi denetim tipine bağlı olarak bir karar sinyali üretir. Eyleyici, karar sinyalini kullanan hareketli bir eleman olup, hata sinyalini küçültecek yönde bir düzeltme sinyali üretir. Karşılaştırıcı görevini yapabilmesi için istenen giriş ( $r(t)$ ) ile algılayıcılarından elde edilen geribeslemenin aynı birim cinsinden olması gerekmektedir. Örneğin basınçla alakalı bir sistem için istenen giriş eğer elektriki olarak uygulanmışsa, sistem çıkışında elde edilen basınç değerinin algılayıcı tarafından elektrik sinyaline çevrilerek karşılaştırıcıya iletilmesi lazımdır. Buradan da anlaşılacağı üzere, algılayıcı, hem sistem çıkışındaki büyüklüğü ölçer hem de gerektiğinde farklı bir sinyal tipine dönüştürür. Bu sayede çıkışta, istenen giriş elde edilir (Yüksel, 2001).

Bir otomatik kontrol sistemi tasarlamak için, önce süreç ya da tüm sistemin özelliklerine uygun matematiksel modele ihtiyaç vardır. Denetleyicinin matematiksel modeli daha sonra geliştirilip, uygulanabilir.

Otomatik kontrol sistemi tasarımı iki tercihe göre yapılabilir. Zaman tanım bölgesine göre yapılan tasarıma göre, bir sistem için göz önünde bulundurulması gereken iki önemli durum vardır. Bunlardan ilki, sistemin kararlılığına bağlı geçici durum tepkisidir. Bir sistemin çıkışı, zamana bağımlı olarak salınım yaparak veya ani

şekilde artma sergilemiyorsa, sistemin kararlı olduğu söylenebilir. Geçici durum tepkisi, yükselme zamanı, aşma (overshoot) yüzdesi ve yatışkın duruma ulaşma zamanının ölçülmesiyle belirlenebilir. Sistem için önem arz eden ikinci durum, durgun durum tepkisidir. Bu da, yatışkın durum hatasının ölçülmesiyle belirlenir (Kuo, 2002). Şekil 2’de, ikinci mertebeden kapalı döngü bir sistemin birim basamak tepkisi üzerinde bu tanımlamalar gösterilmektedir. İkinci mertebeden daha yüksek sistemlerde zaman tanım bölgesi için geçerli bir tasarım yapmak zordur.

İkinci mertebeden daha yüksek sistemlerde frekans bölgesine dayalı tasarım yoluna gidilir. Bu amaçla Bode diyagramı, Nyquist yer eğrisi, genlik-faz eğrisi ve Nichols abağı yöntemleri kullanılabilir (Kuo, 2002).

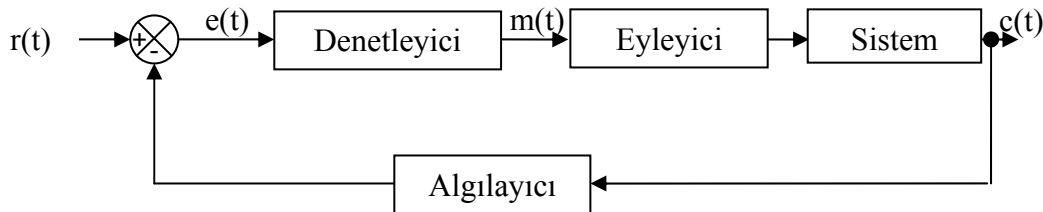
## Denetleyicilere genel bakış

Kontrol sistemi tasarlamada en önemli iş kullanılacak denetleyici yapısını ve elemanlarını belirlemektir. Kontrol yapısı olarak; seri, geribeslemeli, durum geribeslemeli, seri-geribeslemeli ve ileri geribeslemeli kompozisyon yapıları kullanılabilir. Seçilen bu yapı içinde PID tip denetleyiciler yaygın olarak kullanılırlar.

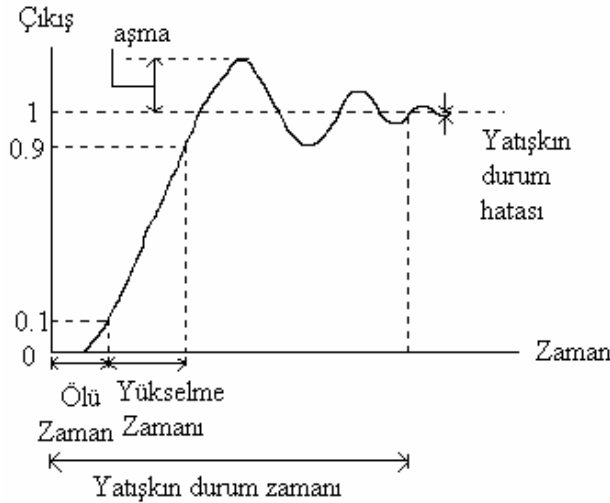
Geleneksel tip denetleyicilerin yanında, gelişmiş denetim algoritmalarından bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritmaya dayalı tasarımlarda kullanılabilir.

## Geleneksel denetleyiciler

Endüstride yaygın olarak kullanılan kontrol düzeneği PID tip denetleyicilerdir. Böyle bir kontrol düzeneğinde, denetleme işlemi üç ayrı birimde gerçekleştirilir. Amaç, aşma zamanını, yatışkın



Şekil 1. Kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı



Şekil 2. İkinci mertebeden bir sistemin birim basamak tepkisi

duruma ulaşma zamanını ve yatışkın durum hatasını belirlenen değerde tutmak ve sistem kararlılığını sağlamaktır (Yüksel, 2001).

PID (Proportional+Integral+Derivative) kontrol; bu üç temel kontrol etkisinin üstünlüklerini tek bir birim içinde birleştiren bir kontrol etkisidir. İntegral etki, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı - durum hatasını sıfırlarken türev etkide, yalnızca PI kontrol etkisi kullanılması haline göre sistemin aynı bağıl kararlılığı için cevap hızını artırır. Buna göre PID kontrol organı sistemde sıfır kalıcı durum hatası olan hızlı bir cevap sağlar.

PID kontrol sistemi, diğerlerine göre daha karmaşık yapıda olup, o oranda pahalıdır. Burada  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  parametrelerinin uygun bir ayarı ile istenen bir kontrol sağlanabilir. Eğer bu katsayılar uygun bir şekilde ayarlanamayacak olursa, PID kontrolün sağlayacağı üstün özelliklerden yararlanılamaz. Üç ayrı denetleme bölümü kısaca aşağıda açıklanmıştır.

**Orantı işlemi -  $P(t)$  kontrol sinyali,** hata sinyalinin belli bir katına getirilir.  $K_p$  oransal denetleyicinin kazancı olarak da adlandırılabilir.

$$P(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

**İntegral işlemi -  $I(t)$  kontrol sinyali,** o andaki zamana bağlı olarak hata sinyalinin kümülatif

toplamı şeklinde,  $K_i$  sabitiyle ifade edilen bir katıdır. Burada  $K_i$  integral denetleyicisinin kazancını göstermektedir.

$$I(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

**Türev işlemi -  $D(t)$  kontrol sinyali,** hata sinyalinin aynı andaki değişim oranının  $K_d$  sabitiyle ifade edilen bir katıdır. Burada  $K_d$  türev alıcı denetleyicinin kazancını göstermektedir.

$$D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Bütün işlemler bir bütün halinde  $m(t)$  kontrol sinyali, şu şekilde yazılır:

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Temel olarak dinamik bir yapı kontrol altında tutulmak istendiğinde, PI tip denetleyiciler bunun için uygundur. Bu işlemler, birinci dereceden diferansiyel denklemlerle açıklanabilir.

Örneğin, bir su tankındaki su seviyesi kontrolü bu tip denetleyicilerle yapılabilir. PID tip denetleyiciler ise, dinamik yapının ikinci planda düşünülmesi durumları için daha uygundur. Buna

örnek olarak, sürtünme hareketinin işin içine girdiği durumlar verilebilir. Sistemin karmaşıklığı arttıkça, basit bir PID tip denetleyicide yeterli olmayabilir.

### Gelişmiş denetim algoritmaları

**Bulanık mantık** - Bulanık mantık denetleyicisi, insanın dilsel ve sezgisel doğasını kullanıldığı bir denetim tipidir. Denetleyici, bulanıklaştırma, kurallar kümesi ve durulaştırma birimlerinden meydana gelir.

Bulanıklaştırıcı birim, bulanık işlem sisteminin ilk birimi olarak devreye girmektedir. Kesin veya geri besleme sonuçları biçiminde bu birime giren bilgiler, burada bir ölçek değişikliğine uğrayarak bulanıklaştırılmaktadır. Başka bir deyişle; bu bilgilerin her birine bir üyelik değeri atanıp, dilsel bir yapıya dönüştürülerek, buradan kural işleme birimine gönderilir. Kural işleme birimine gelen bilgiler, kural işleme biriminde depolanmış bir şekilde bulunan bilgi tabanına dayalı 'if ... and ... then ... else' (eğer ... ise, ... olsun) gibi kural işleme bilgileri ile birleştirilir. Burada sözü edilen mantıksal önermeler, problemin yapısına göre sayısal değerlerle de kurulabilmektedir. Son adımda; problemin yapısına uygun mantıksal karar önermeleri kullanılarak elde edilen sonuçlar durulaştırıcı birime gönderilir. Durulaştırıcı birime gönderilen bulanık küme ilişkilerinde, bir ölçek değişikliği daha gerçekleştirilerek bulanık haldeki bilgilerin her biri gerçel sayılara dönüştürülür (Yen vd., 1995, Chen ve Pham, 2001).

Mikrobilgisayarların kullanımına başlanmasıyla bu tipte denetleyicilerin kullanım yerleri de her geçen gün hızla artmış, özellikle matematik modeli çok iyi yapılamayan sistemlerde uygulamalara gidilmiştir (Yüksel, 2001).

**Yapay sinir ağları** - Yapay sinir ağları insan beynini taklit edebilmek için birbirleriyle uyum içinde çalışan yoğun şekilde bağlanmış bilgi işleme merkezlerinden, yani nöronlardan, oluşmaktadır. İşlem birimleri aslında bir transfer denklemi gibidir. Bilgiyi alır, transfer fonksiyonunu uygulayarak işleme sokar ve bir çıktı oluşturur. Bir yapının bilgiyi nasıl işleyeceği, trans-

fer fonksiyonuna, diğer ağlarla birbirlerine nasıl bağlandıklarına ve kendi sinaptik ağırlıklarına bağlıdır.

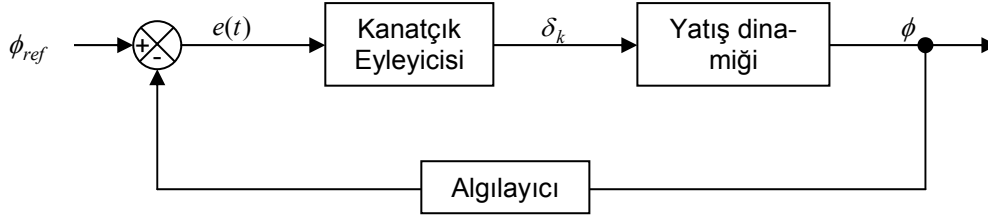
Bir yapay sinir ağı belirli bir amaç için oluşturulur ve insanlar gibi örnekler sayesinde öğrenir. Yapay sinir ağları, tekrarlanan girdiler sayesinde kendi yapısını ve ağırlığını değiştirir. Yapay sinir ağları aynen canlıların sinir sistemi gibi adapte olabilen bir yapıya sahiptir. Yani içsel ve dışsal uyaranlara göre yapısı değişebilmekte ve bu sayede öğrenebilmektedir. Karar verme aşamasında bağlantı ağırlıkları da devreye girer. İşlem birimleri her ne kadar tek başlarına çalışıyor gibi gözükse de, aslında birçok yapay sinir ağı aynı anda çalışır ve dağınık, paralel hesaplama (distributed and parallel computing) örneği gösterir (Pekel, 2008).

**Genetik algoritma** - Birçok problemin çözümünde iyi sonuçlar veren basit bir genetik algoritma (SGA); kopyalama (reproduction), çaprazlama (crossover) ve mutasyon (mutation) olmak üzere üç genetik işlemin birleşiminden oluşur. Bir jenerasyon boyunca yürütülen bu işlemler en büyükleme ya da en küçükleme probleminde jenerasyonlarda elde edilen optimal değerler arasındaki fark sıfırlandığında ya da belli bir değere yakınsadığında sona erdirilir. Ayrıca bir genetik algoritma, programın başında belirlenen bir jenerasyon sayısı kadar tekrarlanıp bitirilebilir. Bu sayının yeterince büyük olması sonuçta elde edilecek değer, fonksiyonun optimal çözümü olma şansını artırır (Işık, 2006).

### Bir uçağın yatış açısı kontrolünde denetleyici etkileri

Bu çalışmada, bir uçağın yatış kontrol sistemi kullanılarak P, PD, PI ve bulanık denetleyici karşılaştırmaları yapılmaktadır. Geleneksel tip denetleyicilerin katsayıları zaman veya frekans alanı yöntemlerine göre bulunabilir. Ziegler-Nichols yöntemi ve kök-yer eğrisine göre büyük yükler kriterine dayanan yöntem kullanılabilir yöntemlerdir (Yıldırım, 2008).

Basit bir yatış açısı otomatik uçuş kontrol sistemi blok diyagramı Şekil 3'de verilmektedir (Nelson, 1998).



Şekil 3. Yatış açısı uçuş kontrol sistemi blok diyagramı

Burada  $\phi$  yatış açına,  $\delta_k$  kanatçık eyleyici çıkışına,  $e$  hata vektörüne,  $\phi_{ref}$  girişe karşılık gelmektedir.

Boeing 747 yolcu uçağının 0.9 M hızı ve 12000 m. irtifadaki kararlılık türevleri ve uçağa ait aerodinamik karakteristikler aşağıdaki gibidir (Nelson, 1998):

$$C_{L_{\delta_k}} = 0.014, \quad C_{L_p} = -0.3, \quad S = 495 \text{ m}^2, \quad b = 58.7 \text{ m}, \\ I_x = 23.9 \text{ kg/m}^3$$

Bu terimler kullanılarak yanal harekete ait kararlılık türevleri,

$$L_{\delta_k} = \frac{QSbC_{L_{\delta_k}}}{I_x} = 0.18 \quad (5)$$

$$L_p = \frac{QSb^2C_{L_p}}{2I_xu_0} = -0.45 \quad (6)$$

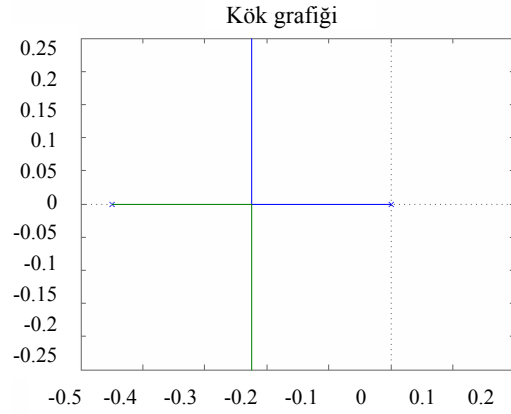
olarak hesaplanmıştır.

Kararlılık türevleri kullanılarak yatış dinamiğine ait transfer fonksiyonu

$$\frac{\phi}{\delta_k} = \frac{L_{\delta_k}}{s(s - L_p)} = \frac{0.18}{s(s + 0.45)} \text{ olarak elde edilmiştir.}$$

Eyleyici transfer fonksiyonu P tipi denetleyiciye uygun olarak  $\frac{\delta_k}{e} = K_p$  şeklinde tanımlanmıştır. Algılayıcının mükemmel ölçtüğü varsayılarak algılayıcı transfer fonksiyonu olarak birim geribesleme kullanılmıştır. Sistemin kök eğrisi çizimi Şekil 4'deki gibi elde edilmiştir.

Sönümleme oranının 0.707 olduğu kabulü yapılarak, orijinden  $45^\circ$  açı yapacak şekilde bir doğru çizilirse, grafikte doğrunun kök grafiğini kestiği noktanın  $s = 0.225 + 0.225i$  olduğu görülür.



Şekil 4. Sistemin kök eğrisi

İleri çevrim transfer fonksiyonu, kök yer eğrisi yöntemindeki büyüklük kriterine göre

$$\frac{|K_p| \cdot 0.18}{|s||s + 0.45|} = 1 \quad (7)$$

şeklindedir. Grafikte elde edilen  $s = 0.225 + 0.225i$  değeri burada yerine yazılırsa  $K_p = 1.257$  olarak elde edilir. Bu kazanç değeri kullanılarak elde edilen birim basamak cevapları Şekil 5'de verilmektedir.

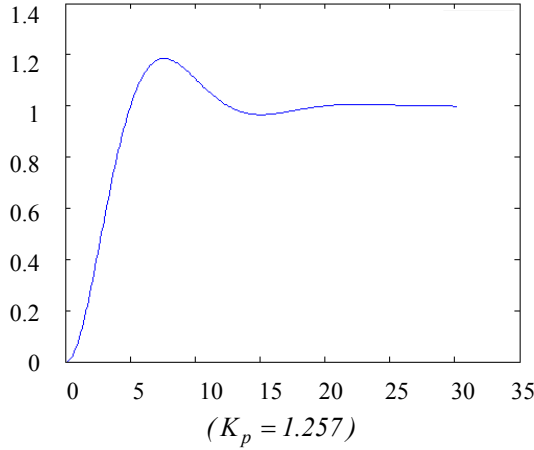
Şekil 5 incelendiğinde, %20 civarında bir aşma olduğu ve sonrasında istenen çıkışın elde edildiği görülmektedir.

İkinci olarak bu sisteme, zaman tasarım bölgesine göre PD denetleyici tasarlanacağı düşünülerek öncelikle sistemin ileri yol transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{0.18(K_p + K_d s)}{s(s + 0.45)} \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda, birim negatif geribeslemeli kapalı çevrim transfer fonksiyonu ise aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{\phi(s)}{\phi_{ref}(s)} = \frac{0.18(K_p + K_d s)}{s^2 + (0.45 + 0.18K_d)s + 0.18K_p} \quad (9)$$



Şekil 5. Sistemin birim basamak cevabı

Konum, hız ve ivme kararlılık hataları,

$$K_k = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \infty \text{ ve } e_{ss} = \frac{1}{1 + K_k} = 0 \quad (10)$$

$$K_h = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = 0.4K_p \text{ ve } e_{ss} = \frac{1}{K_h} = 2.5 / K_p \quad (11)$$

$$K_{iv} = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s) = 0 \text{ ve } e_{ss} = \frac{1}{K_{iv}} = \infty \quad (12)$$

şeklinde olduğu ve sistemin birim basamak ve rampa fonksiyon girişlerine uygun cevap verdiği anlaşılır. Birim basamak girişler için kararlılık hal hatasının 0.1 eşit veya küçük olan bir tasarım yapılmak isteniyorsa,  $K_p \geq 25$  seçilmelidir.

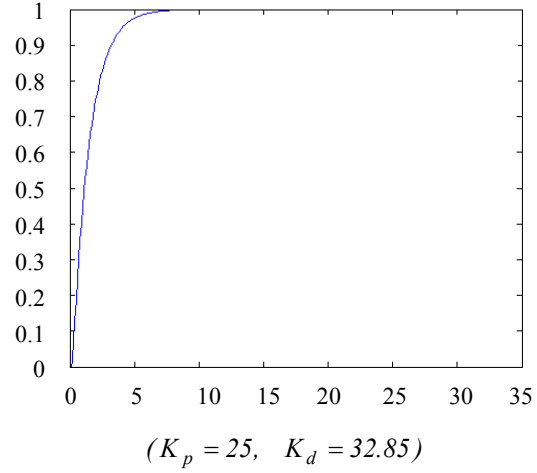
Öte yandan karakteristik denklem,

$$s^2 + (0.45 + 0.18K_d)s + 0.18K_p = 0 \quad (13)$$

olarak yazılıp,  $K_p = 25$  olarak seçilen bir kazanç değeri alınırsa, sistemin sönüm oranı,

$$\zeta = \frac{0.45 + 0.18K_d}{2} \quad (14)$$

şeklinde olur. Sönüm oranının  $\zeta = 0.707$  olması isteniyorsa eşitliğinden  $K_d = 32.85$  olarak elde edilir. Bu katsayılar kullanılarak sistemin birim basamak cevabı Şekil 6'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 6. PD denetleyici kullanılarak elde edilen birim basamak cevabı

Şekil 6 incelendiğinde sistemin yerleşme zamanının oldukça kısa olduğu görülmektedir. Sistemin ileri yol transfer fonksiyonu ikinci dereceden olmasına rağmen seçilen PD kazançları nedeniyle sistem artık birinci dereceden sistem davranış özelliği göstermektedir. Konum kararlılık hatasının sıfır ve hız kararlılık hatasının sıfıra çok yakın olması sebebiyle sistem birim darbe ve birim basamak girişlere uygun olmakla birlikte, ivme kararlılık hatasının  $\infty$  olması sebebiyle parabolik girişli fonksiyonlar için uygun değildir.

Üçüncü olarak verilen sisteme, zaman tasarım bölgesine göre PI denetleyici tasarlanacağı düşünülmektedir öncelikle sistemin ileri yol transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{0.18K_p(s + K_i / K_p)}{s^2(s + 0.45)} \quad (15)$$

şeklinde yazılabilir (Nelson, 1998).

Konum, hız ve ivme kararlılık hataları,

$$K_k = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \infty \text{ ve } e_{ss} = \frac{1}{1 + K_k} = 0 \quad (16)$$

$$K_h = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = \infty \text{ ve } e_{ss} = \frac{1}{K_h} = 0 \quad (17)$$

$$K_{iv} = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s) = 0.4K_i \text{ ve } e_{ss} = \frac{1}{K_{iv}} = 2.5 / K_i \quad (18)$$

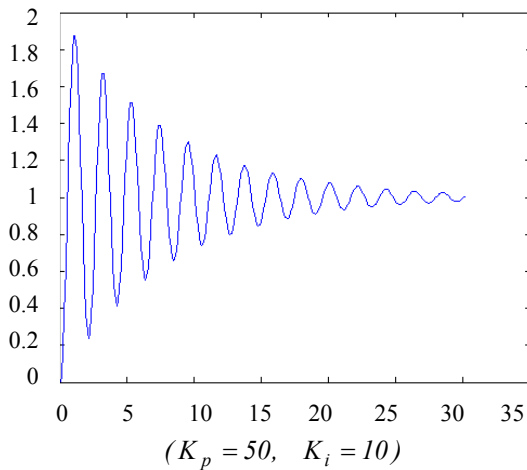
olduğu ve sistemin birim basamak, rampa ve parabolik fonksiyon girişlerine uygun cevap verdiği anlaşılr. Tasarımın, birim basamak girişler için uygun olduğu görülmektedir.

Öte yandan karakteristik denklem,

$$s^3 + 0.45s^2 + 0.18K_p s + 0.18K_i = 0 \quad (19)$$

olarak yazılıp, Routh Hurwitz kararlılık testi uygulanırsa,  $0 < \frac{K_i}{K_p} < 0.45$  için sistemin kararlı

olduğu görülür. Bu şarta uygun olarak seçilen kazançlara göre, sistemin birim basamak cevabı Şekil 7'deki gibi elde edilmiştir.

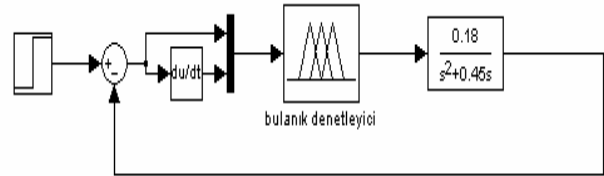


Şekil 7. PI denetleyici kullanılarak elde edilen birim basamak cevabı

Şekil 7 incelendiğinde sistemin yerleşme zamanının PD denetleyicili sisteme göre daha uzun olduğu görülmektedir. Konum kararlılık hatasının ve hız kararlılık hatasının sıfır olması sebebiyle sistem birim darbe ve birim basamak girişlere uygun olmakla birlikte, ivme kararlılık ha-

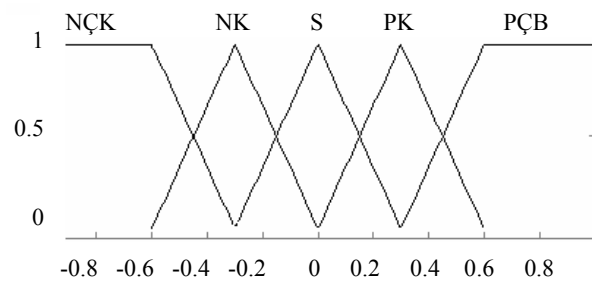
tasının  $\frac{2.5}{K_i}$  olması sebebiyle parabolik girişli fonksiyonlar içinde uygundur. Ancak % 90 civarı bir aşma söz konusudur. Kararlılık hal hatası daha küçük olarak seçilmek isteniyorsa  $K_i$  kazanç değeri daha büyük olarak seçilecek ve ona bağlı olarak  $K_p$  de değişecektir. Routh Hurwitz kararlılık testinden elde edilen aralık için  $\frac{K_i}{K_p} < 0.45$  şartı şeklinde daha iyi bir oran seçilirse sistemin daha çabuk yatışkın duruma gelmesi sağlanabilir.

Son olarak verilen sisteme, bulanık denetleyici tasarlanacağı düşünülerek, sistem blok diyagram yapısı aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 8. Sistem blok yapısı

Sistemde hata, hatanın değişimi ve çıkışa ait üyelik fonksiyonları Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Bu üyelik fonksiyonlarının seçimlerinde, sezgisel yol kullanılmıştır.

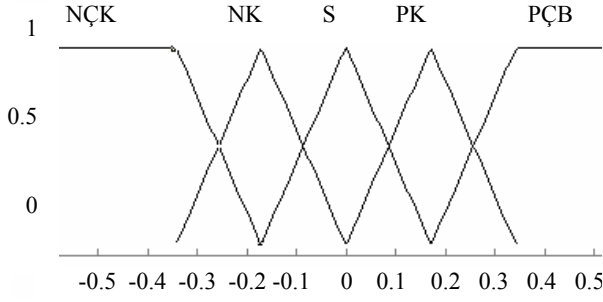


Şekil 9. Hata üyelik fonksiyonları

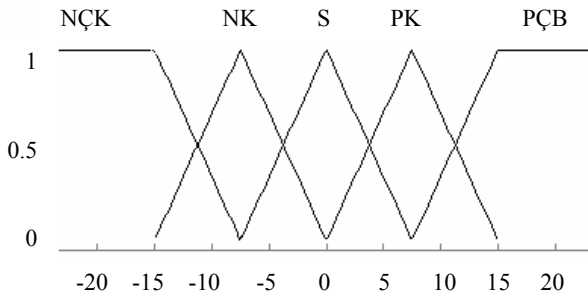
Şekil 9-11'deki üyelik fonksiyonları ve Tablo 1'deki kural tablosu kullanılarak sistemin birim basamak cevabı Şekil 12'deki gibi elde edilmiştir.

Sisteme ait kural tablosu ise Tablo 1'deki gibi oluşturulmuştur.





Şekil 10. Hatanın değişimi üyelik fonksiyonları



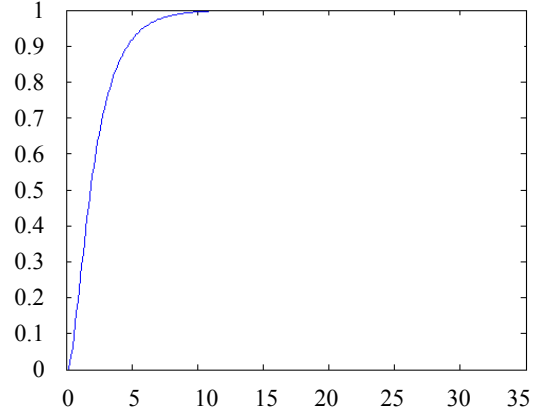
Şekil 11. Çıkış üyelik fonksiyonları

Tablo 1. Sisteme ait kural tablosu

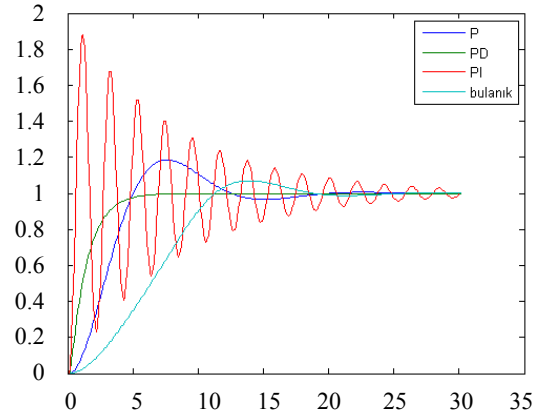
$\dot{e}$	$e$				
	NÇK	NK	S	PK	PÇB
NÇK	NÇK	NÇK	NK	NK	S
NK	NÇK	NK	NK	S	PK
S	NK	NK	S	PK	PK
PK	NK	S	PK	PK	PÇB
PÇB	S	PK	PK	PÇB	PÇB

İyi tasarlanmış bir bulanık denetleyici ile daha iyi performans elde edilebilir. Her dört denetleyicinin performansları Şekil 13'de verilmektedir.

Şekil 13 incelendiğinde bulanık denetleyicili sistemin yerleşme zamanının P ve PD denetleyicili sisteme göre daha uzun, PI denetleyicili sisteme göre ise daha kısa olduğu görülmektedir. Öte yandan aşma açısından incelendiğinde en iyi performansı PD tip denetleyici ve bulanık denetleyici göstermiştir. Şüphesiz bu performansların daha da geliştirmek söz konusudur. Daha yüksek mertebeden sistemlerde P ve PD tip denetleyicilerin kullanım şanslarının daha az olduğunu unutmamak gerektir.



Şekil 12. Bulanık denetleyici kullanılarak elde edilen birim basamak cevabı



Şekil 13. Denetleyici performansları

## Sonuçlar

Bu çalışmada, uçuş kontrol sisteminde önemli bir yer tutan yatış açısı kontrolünün klasik P, PD, PI denetleyici ile bulanık denetleyici kullanılarak tasarımları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

P denetleyicili sistem % 20 civarı bir aşmayla beraber istenen çıkış elde edilebilmiştir. Burada büyüklük kriteri uygulanarak ilgili kazanç değeri bulunmuştur.

PD denetleyicili sistem incelendiğinde, sistemin yerleşme zamanının oldukça uzun olduğu görülmektedir. Sistemin ileri yol transfer fonksiyonu ikinci dereceden olmasına rağmen seçilen PD kazançları nedeniyle sistem artık birinci dereceden sistem davranış özelliği göstermektedir.

Konum kararlılık hatasının sıfır ve hız kararlılık hatasının sıfıra çok yakın olması sebebiyle sistem birim darbe ve birim basamak girişlere uygunken, ivme kararlılık hatasının  $\infty$  olması sebebiyle parabolik girişli fonksiyonlar için uygun değildir. PD denetleyicili sistem tasarlanılırken, hız kararlılık hal hatasının daha küçük olması isteniyorsa  $K_p$  kazanç değeri daha büyük olarak seçilebilir. Böylece birim basamak girdilere daha uygun cevap elde edilebilir. Fakat parabolik fonksiyon girdileri için PD denetleyici uygun bir yol değildir.

PI denetleyicili sistemin yerleşme zamanının PD denetleyicili sisteme göre daha uzun olduğu görülmektedir. Konum kararlılık hatasının ve hız kararlılık hatasının sıfır olması sebebiyle sistem birim darbe ve birim basamak girişlere uygunken, ivme kararlılık hatasının  $\frac{2.5}{K_i}$  gibi bir değer olması sebebiyle seçilen uygun bir  $K_i$  ile parabolik girişli fonksiyonlar içinde uygun hale getirilebilir. Uygulamada % 90 civarı bir maksimum aşma söz konusudur. PI denetleyicili sistem tasarlanılırken, ivme kararlılık hal hatasının daha küçük olması isteniyorsa  $K_i$  kazanç değeri daha büyük olarak seçilebilir. Böylece parabolik girdilere daha uygun cevap elde edilebilir.

Bulanık denetleyicili sistemin yerleşme zamanının PD denetleyicili sisteme göre daha uzun, PI denetleyicili sisteme göre ise daha kısa olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak çalışılan sisteme göre, eğer yatışkın duruma daha çabuk ulaşılacak isteniyor ve

belli bir kararlılık hata tolerans değeri söz konusuysa P veya PD denetleyicili sistem, yatışkın duruma gelme zamanından daha çok kararlılık hatası değerinin minimum olması hedefse PI denetleyicili sistem ya da bunların kesişimi şeklinde bir çözüm aranıyorsa bulanık denetleyicili sistem kullanım yoluna gidilebilir.

## Kaynaklar

- Chen, G. ve Pham, T. T., (2001). *Introduction To Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, And Fuzzy Control Systems*, CRC Press, Florida.
- Işık, Y., (2006). Genetik Algoritma Tabanlı Bulanık Kontrolün Uçuş Kontrol Sistem Tasarımına Uygulanması, *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kuo, B. C., (2002). *Otomatik Kontrol Sistemleri*, Literatür Yayınları, İstanbul.
- Nelson, R. C., (1998). *Flight Stability And Automatic Control*, McGraw-Hill, Singapore.
- Yen, J., Langari, R. ve Zadeh, L. A., (1995). *Industrial Applications Of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, IEEE Press, New York.
- Yıldırım, Ş., Savaş, S., (2008). PID Denetim Organı Kullanarak Uçaklarda Kalkış ve İniş Halinde Yunuslama (Pitch) Açısı Kontrolü, *HaSeM'08, Kayseri VII. Havacılık Sempozyumu*, 276-281, Kayseri.
- Yüksel, İ., (2001). *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri*, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- 
- Pekel, I. Ö., (2008). Yapay Sinir Ağları. <http://e-bergi.com/2008/Subat/Yapay-Sinir-Aglari> (13.06.2008)